

SIMULASI NUMERIK ALIRAN FLUIDA DALAM PENSTOCK DENGAN MENGGUNAKAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)*

Gilang Ramadhan Supit¹⁾, Hengky Luntungan²⁾, Benny Maluegha³⁾,
Teknik Mesin Universitas Sam Ratulangi Manado^{1,2,3)}

2014

ABSTRACT

Indonesia has a potential water power resources that can be generated into electricity through hydro power plant (PLTA) and micro hydro power plant (PLTM). The water from the reservoir flow down to the turbine in a penstock, therefore the analysis of the characteristics of the fluid flow in penstock is interesting.

This research worked out with a simulation to find the characteristics of fluid flow in the penstock using Computational Fluid Dynamics (CFD) by applying software GAMBIT 2.3.16 and Fluent 6.3.26. Penstock dimension was using the data available and was simulating to find out the characteristics of the flow. The dominant fluid flow characteristics are static pressure, dynamic pressure, total pressure, fluid velocity and shear stress.

Result show that for static pressure in inlet 305.769,9 Pa, default-interior 305.769,9 Pa, wall 305,769,9 Pa and outlet 300.009,8 Pa. The dynamic pressure in inlet 3.595,365 Pa, default-interior 4.253,647 Pa, wall 3.602,503 Pa and outlet 4.229,900 Pa. The total pressure in inlet 309.365,3 Pa, default-interior 309.365,3 Pa, wall 309.365,3 Pa and outlet 304.235,4 Pa. The velocity of fluid in inlet 2,681554 m/second, default-interior 2,916727 m/second, wall 2,684047 m/second and outlet 2,908574 m/second. The shear stress in inlet 5,175604 Pa, default-interior 9,589236 Pa, wall 9,589236 Pa and outlet 9,518271 Pa.

Keywords: Penstock, Computational Fluid Dynamics (CFD), Fluid Flow Characteristics

ABSTRAK

Indonesia memiliki potensi tenaga air yang cukup besar yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik, melalui PLTA dan PLTM, *penstock* berperan penting karena berfungsi sebagai pipa penyalur aliran fluida antara bak penampung dengan turbin sehingga analisis karakteristik aliran fluida di dalam *penstock* merupakan hal yang menarik untuk diteliti.

Penelitian ini dilakukan dengan cara simulasi untuk mencari hasil analisis karakteristik aliran fluida di dalam *penstock* dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dengan bantuan perangkat lunak GAMBIT 2.3.16 dan Fluent 6.3.26. Data yang diambil kemudian digunakan untuk pembuatan *penstock* secara virtual dan disimulasikan untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. Karakteristik aliran fluida yang dominan adalah tekanan statis, tekanan dinamis, total tekanan, kecepatan fluida dan tegangan geser.

Hasil simulasi untuk tekanan statis pada saluran masuk adalah 305.769,9 Pa, *default-interior* adalah 305.769,9 Pa, dinding *penstock* 305.769,9 Pa dan saluran keluar 300.009,8 Pa. Tekanan dinamis pada saluran masuk sebesar 3.595,365 Pa, di *default-interior* adalah 4.253,647 Pa, dinding *penstock* adalah 3.602,503 Pa dan saluran keluar 4.229,900 Pa. Total tekanan di saluran masuk adalah 309.365,3 Pa, pada *default-interior* adalah 309.365,3 Pa, di dinding *penstock* adalah 309.365,3 Pa dan saluran keluar sebesar 304.235,4 Pa. Kecepatan fluida pada saluran masuk adalah 2,681554 m/detik, di *default-interior* adalah 2,916727 m/detik, di dinding sebesar 2,684047 m/detik dan saluran keluar sebesar 2,908574 m/detik. Tegangan geser di saluran masuk adalah 5,175604 Pa, di *default-interior* adalah 9,589236 Pa, di dinding *penstock* adalah 9,589236 Pa dan di saluran keluar sebesar 9,518271 Pa.

Kata kunci: *Penstock, Computational Fluid Dynamics (CFD), Karakteristik Aliran Fluida.*

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi merupakan salah satu kebutuhan vital bagi kehidupan manusia. Oleh karena itu, manusia senantiasa berupaya memenuhi kebutuhan energinya setiap hari, salah satunya adalah energi listrik. Penggunaan energi meningkat dengan pesat seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk serta berkembangnya pertumbuhan ekonomi. Akibatnya saat ini masalah krisis energi khususnya di bidang energi listrik sangat terasa dimana-mana termasuk di Indonesia. Hal ini mengakibatkan terhambatnya semua aktivitas yang membutuhkan energi listrik sebagai penggerak utamanya. Kebutuhan energi listrik nasional terus meningkat, yang tertinggi terjadi pada tahun 2002 yaitu sebesar 112,2 TWh dan diperkirakan akan terus meningkat menjadi 356,8 TWh pada tahun 2020 (Kadiman, 2006).

Energi terbarukan sangat berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai pemasok utama energi untuk kebutuhan sehari-hari. Pada tahun 2011, total potensi tenaga air di Indonesia diperkirakan sebesar 75.000 MW. Data Ditjen Energi Terbarukan dan Konservasi Energi menunjukkan bahwa Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA) yang terpasang sampai tahun 2011 memiliki kapasitas sebesar 5.711,29 MW di seluruh Indonesia. Sedangkan untuk PLTM (Pusat Listrik Tenaga Mini), pada tahun 2010

memiliki kapasitas 228.749 KW (Anonymous, 2011).

Penstock berperan sangat penting untuk suatu PLTA atau PLTM karena *penstock* berfungsi sebagai pipa penyalur aliran fluida antara bak penampung atau reservoir dengan turbin. Aliran fluida itu akan menggerakkan turbin sehingga generator berputar dan menghasilkan listrik. Oleh karena itu, analisis karakteristik aliran fluida di dalam *penstock* merupakan hal yang menarik untuk diteliti.

1.2 Rumusan Masalah

Bagaimana karakteristik aliran fluida yang mengalir di dalam *penstock* yang disimulasikan dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Data *penstock* yang digunakan sebagai sumber penelitian adalah *penstock* yang ada di PLTM di Sungai Makariki, Desa Hatu, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku.
2. Aliran air yang dianalisis hanya yang berada di sepanjang *penstock*.
3. Perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini adalah *Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit* (GAMBIT) 2.3.16 dan Fluent 6.3.26.

4. Dalam penelitian ini hanya dilakukan simulasi, bukan untuk mendesain *penstock*.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan tujuan untuk menganalisis karakteristik aliran fluida yang mengalir di dalam *penstock* yang terdapat di PLTM Hatu dengan menggunakan CFD.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini sangat bermanfaat, antara lain:

1. Dapat dijadikan sebagai referensi dan masukan kepada pihak PLTM Hatu untuk kegiatan perawatan *penstock*.
2. Sebagai salah satu cara baru (simulasi) mengenai analisis aliran fluida di dalam *penstock* yang menggunakan CFD.

II. LANDASAN TEORI

2.1 Karakteristik Aliran Fluida

Fluida adalah zat yang dapat bergerak ketika dikenai gaya. Fluida dapat berubah bentuk dan bersifat tidak permanen. Fluida membentuk berbagai jenis benda padat sesuai dengan bentuk benda yang dilewatinya (Al-Shemmeri, 2012). Karakteristik aliran fluida meliputi tekanan statis, tekanan dinamis, total tekanan, kecepatan fluida dan tegangan geser.

2.2 Tenaga Air

PLTA atau PLTM mengkonversi energi potensial yang terdapat pada air di dalam bendungan menjadi energi kinetik melalui *rotating shaft*. Turbin mulai berputar oleh gerakan air dan merubah energi kinetik menjadi energi mekanik. Generator berputar merubah energi mekanik menjadi energi listrik (Subekti dan Susatyo, 2009).

2.3 Penstock

Penstock adalah pipa yang terdapat di atas maupun di bawah permukaan tanah sesuai dengan keperluan dan keadaan geografis maupun geologi dimana pipa tersebut ditempatkan (Permatasari, 2008).

Penstock dibuat dengan teliti agar mampu menahan air bertekanan tinggi dari reservoir sehingga ketika *control gate* ataupun *valve* ditutup secara tiba-tiba tidak menyebabkan kerusakan pada *penstock*. Fenomena ini yang sering disebut dengan *water hammer*. *Water hammer* adalah fenomena yang terjadi saat suatu aliran fluida dihentikan secara tiba-tiba, baik itu disengaja atau tidak (Subekti dan Susatyo, 2009).

2.4 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Penelitian hingga desain untuk berbagai fenomena menarik tersebut membutuhkan suatu cara yang mampu

memprediksi hasil dari berbagai macam atau jenis karakteristik fluida yang diteliti atau disimulasi dengan akurat dan cepat. Maka berkembanglah suatu ilmu yang dinamakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) (Tuakia, 2008).

2.4.1 Perangkat lunak GAMBIT (*Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit*)

GAMBIT dan Fluent adalah salah satu jenis perangkat lunak yang banyak digunakan untuk menyelesaikan masalah yang berhubungan dengan CFD. Perangkat lunak GAMBIT merupakan salah satu *preprocessor* yang didesain untuk membantu membuat model dan melakukan *meshing* pada model untuk analisis atau simulasi CFD.

2.4.2 Perangkat lunak Fluent

Fluent adalah salah satu jenis perangkat lunak yang sering digunakan dalam menyelesaikan masalah yang berhubungan dengan CFD yang menggunakan metode volume hingga. *Mesh* yang fleksibel dan lengkap adalah salah satu fasilitas dari Fluent, sehingga dapat menyelesaikan kasus aliran fluida dengan *mesh* yang tidak terstruktur sekalipun dengan cara yang relatif mudah (Tuakia, 2008).

2.5 Simulasi

Simulasi komputer adalah sebuah proses untuk merancang sebuah model logika matematika dari suatu sistem nyata dan melakukan percobaan dengan model ini pada sebuah komputer (Pritsker, 1986).

III. METODOLOGI PENELITIAN

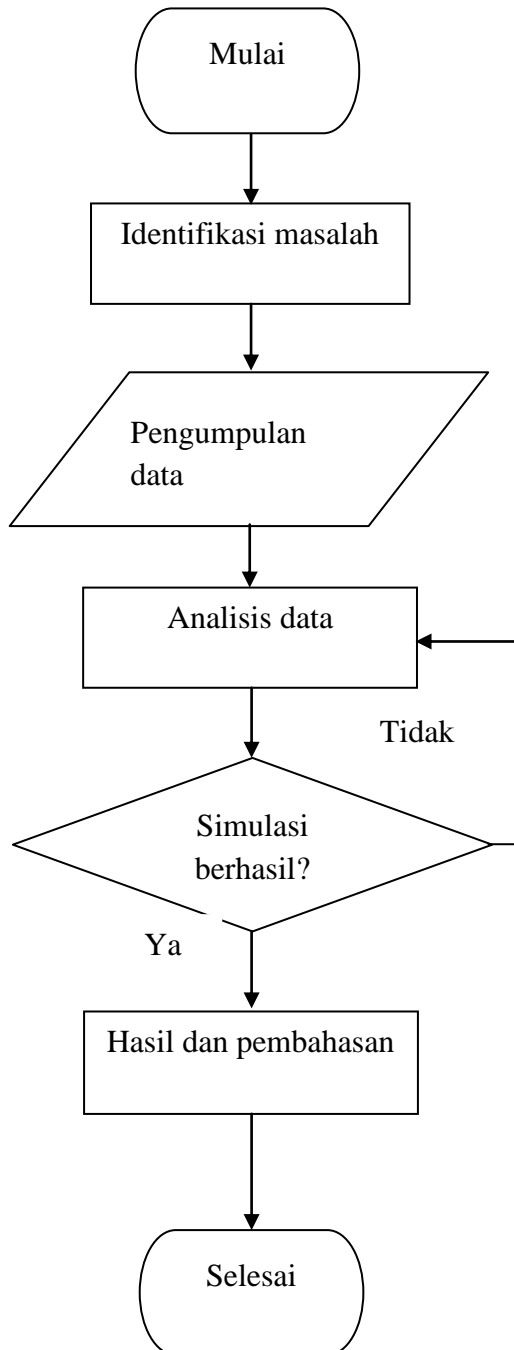
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Sam Ratulangi Manado dan dimulai pada bulan Februari hingga Agustus 2014.

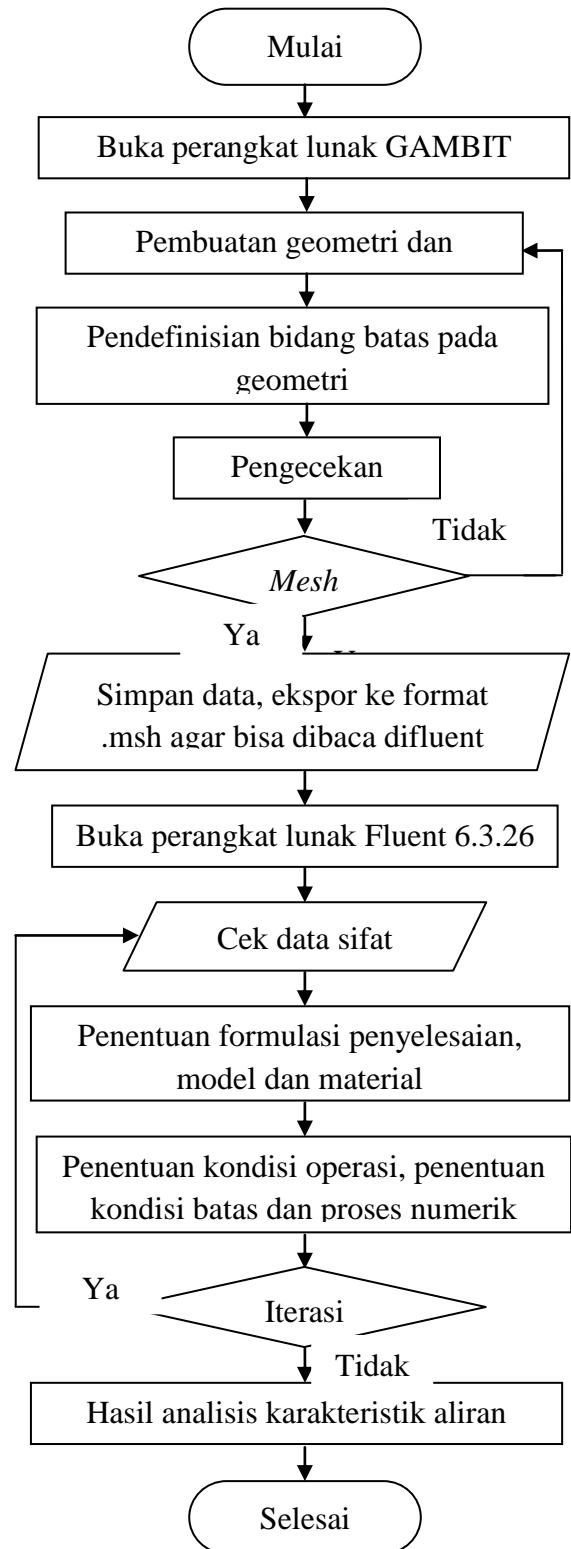
3.2 Bahan dan Peralatan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah data skripsi Riseda Salatnaya, mahasiswi Jurusan Teknik Elektro Universitas Sam Ratulangi Manado dengan judul skripsi yaitu Studi Pendahuluan Kelayakan PLTM Hatu pada tahun 2008 dengan menggunakan *laptop* yang dilengkapi dengan GAMBIT dan Fluent.

3.3 Prosedur Penelitian



3.4 Prosedur Penelitian Berupa Simulasi



IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

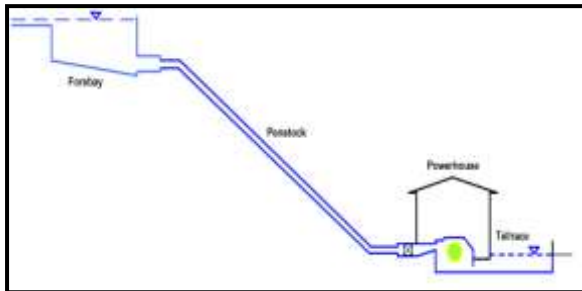
4.1 Hasil Pengolahan Data

Menurut Salatnaya (2008), data dimensi *penstock* yang hasilnya akan digunakan pada perangkat lunak Fluent 6.3.26 maka didapat hasil sebagai berikut:

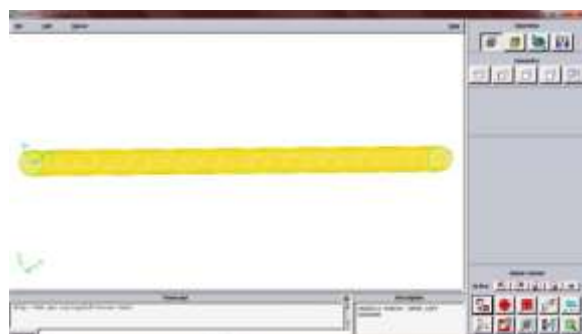
Tabel 4.1 Data *penstock* yang digunakan dalam penelitian

No.	Dimensi <i>penstock</i>	Hasil perhitungan
1	Diameter (m)	0,85
2	Panjang (m)	124
3	Tebal minimum (m)	0,00325
4	Debit air (m ³ /detik)	1,52

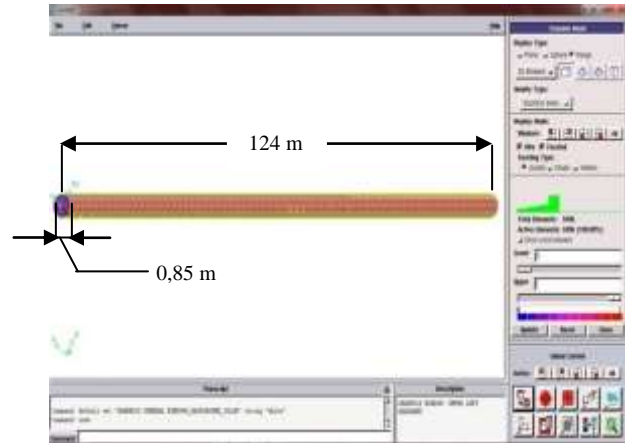
4.1.1 Penampang dan model *penstock*



Gambar 4.1 Penampang *penstock* yang terdapat di PLTM



Gambar 4.2 Penampang *penstock* yang telah melalui proses *meshing*



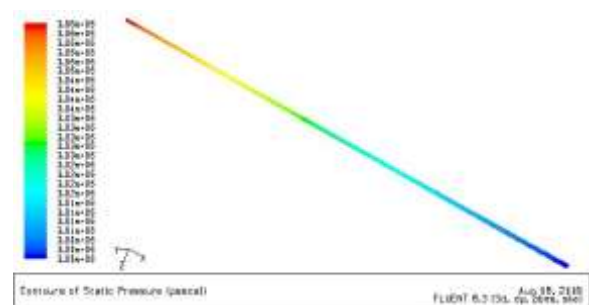
Gambar 4.3 Model dari *penstock* yang dianalisis beserta dimensinya

4.2 Hasil Analisis Karakteristik

Aliran Fluida Dalam *Penstock*

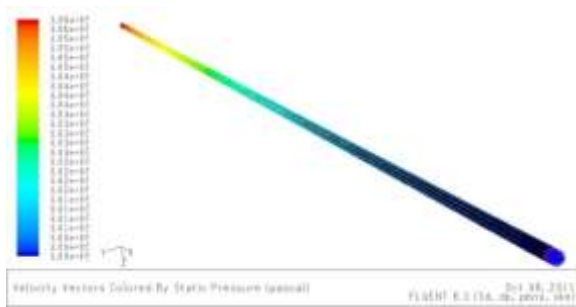
No.	Hasil perhitungan	Bidang Batas			
		Saluran Masuk	Interior-default	Dinding	Saluran Keluar
1.	Tekanan statis (Pa)	305.769,9	305.769,9	305.769,9	300.009,8
2.	Tekanan dinamis (Pa)	3.595,365	4.253,647	3.602,053	4.229,900
3.	Total tekanan (Pa)	309.365,3	309.365,3	309.365,3	304.235,4
4.	Kecapatan air (m/detik)	2,681554	2,916727	2,684047	2,908574
5.	Tegangan geser (Pa)	-5,175604	9,589236	9,589236	9,518271
6.	Tekanan absolut (Pa)	407.094,4	407.094,9	407.094,9	401.334,8
7.	Koefisien gesekan	8,449965	15,655900	15,655900	15,540040
8.	Energi kinetik turbulensi (J)	0,0077527	0,0311980	0,0311980	0,0311046
9.	Koefisien tekanan	499.216,3	499.216,3	499.216,3	489.812,0

4.2.1 Hasil simulasi berupa tekanan statis



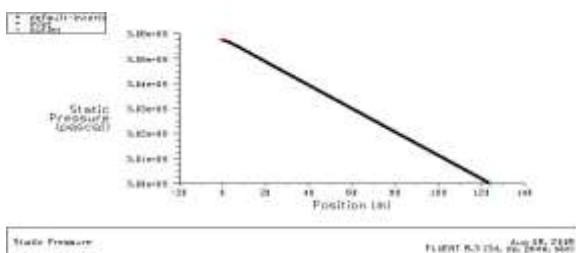
Gambar 4.4 Kontur tekanan statis *penstock*

Gambar di atas menunjukkan bahwa tekanan statis pada saluran masuk lebih besar daripada saluran keluar.



Gambar 4.5 Vektor tekanan statis pada *penstock*

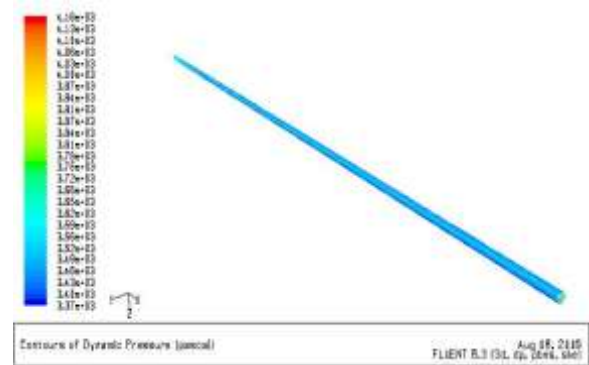
Vektor menunjukkan arah dari tekanan statis yang menuju ke saluran keluar yang berwarna biru. Tekanan statis mengalami penurunan di sepanjang *penstock* yang besarnya akan dihitung pada subbab 4.4.6.



Gambar 4.6 Grafik hubungan tekanan statis dan posisi *penstock*.

Tekanan statis pada saluran masuk menunjukkan angka sebesar 305.769,9 Pa dan pada saluran keluar adalah sebesar 300.009,8 Pa.

4.2.2 Hasil simulasi berupa tekanan dinamis



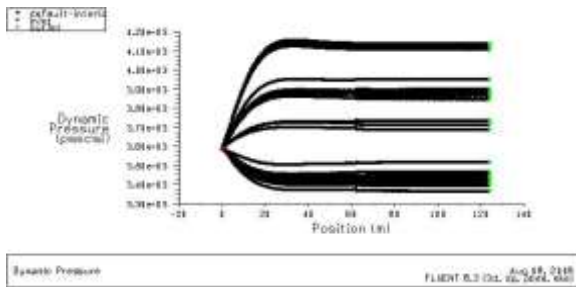
Gambar 4.7 Kontur tekanan dinamis pada *penstock*

Tekanan dinamis yang paling besar terjadi pada bagian tengah *penstock*, kemudian terus mengecil hingga mencapai bagian dinding dan terjadi di sepanjang *penstock*.



Gambar 4.8 Vektor tekanan dinamis pada *penstock*

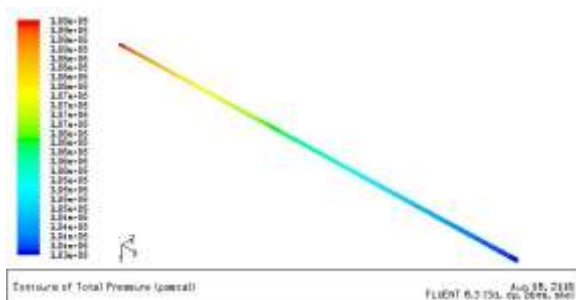
Vektor dari tekanan dinamis menunjukkan arah dari saluran masuk ke saluran keluar, pada bagian tengah arah aliran fluida menunjukkan arah yang sama dengan bagian lainnya meskipun besarnya tekanan berbeda.



Gambar 4.9 Grafik tekanan dinamis yang terjadi di sepanjang *penstock*

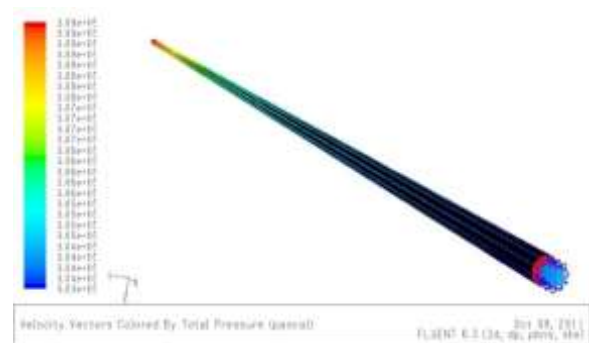
Besarnya tekanan dinamis yang terjadi di sepanjang *penstock* yang berbeda-beda, tergantung pada posisi atau kedudukannya masing-masing.

4.2.3 Hasil simulasi berupa tekanan total



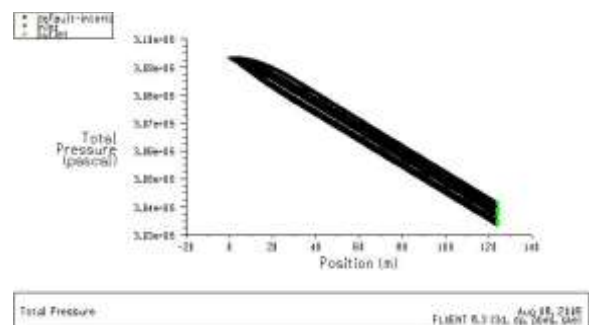
Gambar 4.10 Kontur total tekanan pada *penstock*

Tekanan total pada *penstock* berhubungan dengan perhitungan besarnya tekanan jatuh yang terjadi di sepanjang *penstock*, dari Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa tekanan pada saluran masuk lebih besar dibanding dengan saluran keluar.



Gambar 4.11 Vektor total tekanan pada *penstock*

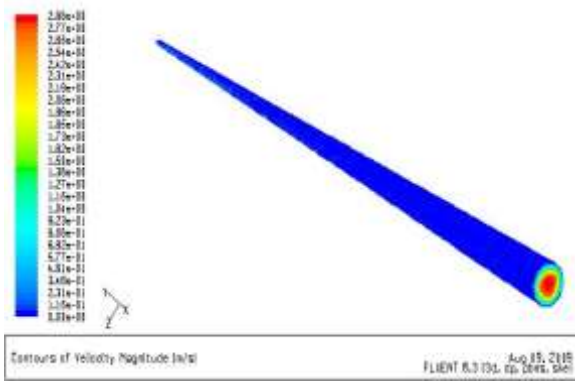
Vektor total tekanan mengarah ke saluran keluar *penstock*. Total tekanan yang terjadi pada bidang batas saluran masuk, *default-interior* dan dinding memiliki besar yang sama yaitu 309.365,3 Pa.



Gambar 4.12 Grafik hubungan antara total tekanan dan posisi *penstock*

Tekanan total maksimal yang terjadi pada saluran masuk *penstock* adalah sebesar 309.365,3 Pa, dan nilai minimalnya adalah sebesar 309.340,9 Pa.

4.2.4 Hasil simulasi berupa kecepatan air



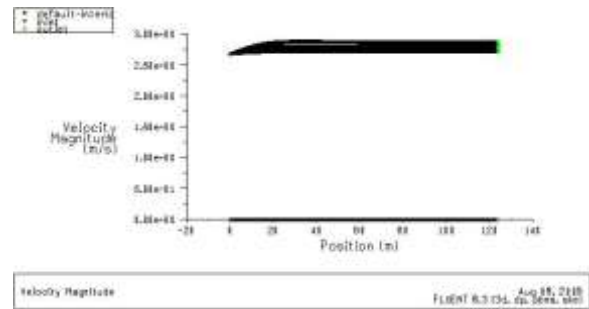
Gambar 4.13 Kontur kecepatan air pada *penstock*

Kecepatan air di sepanjang *penstock* meningkat. Pada saluran masuk kecepatannya adalah 2,681554 m/detik dan pada saluran keluar 2,908574 m/detik. Kecepatan air semakin berkurang dari bagian tengah *penstock* hingga mencapai permukaan dari dinding dan terjadi di sepanjang *penstock*.



Gambar 4.14 Vektor kecepatan air pada *penstock*

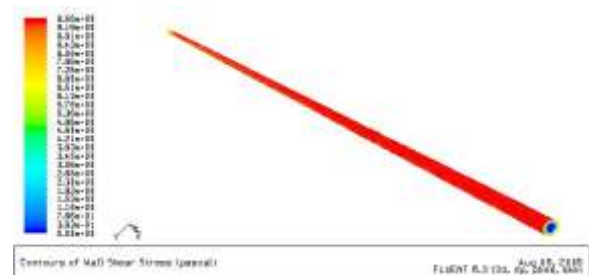
Vektor kecepatan air menunjukkan arah yang sama dengan tekanan yaitu ke arah saluran keluar dari *penstock*.



Gambar 4.15 Grafik hubungan antara kecepatan air dan posisi *penstock*

Kecepatan air yang mengalir di sepanjang *penstock* meningkat hingga mencapai saluran keluar.

4.2.5 Hasil simulasi berupa tegangan geser



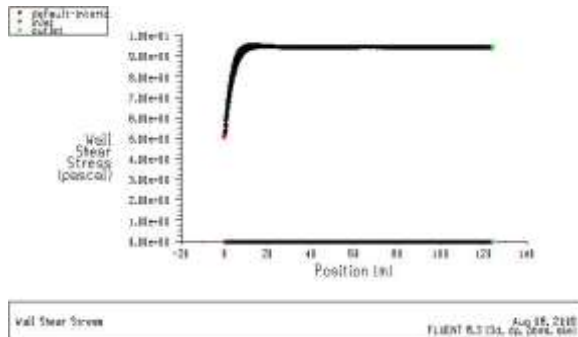
Gambar 4.16 Kontur dari tegangan geser di sepanjang *penstock*

Tegangan geser yang terjadi pada saluran masuk sebesar 5,175604 Pa dan pada saluran keluar adalah 9,518271 Pa.



Gambar 4.17 Vektor dari tegangan geser di sepanjang *penstock*

Vektor dari tegangan geser yang terjadi di sepanjang *penstock* mengarah ke saluran keluar.



Gambar 4.18 Grafik tegangan geser yang terjadi di sepanjang *penstock*

Tegangan geser yang tertinggi terjadi pada bagian *default-interior* yaitu sebesar 9,589236 Pa, melebihi saluran masuk yaitu 5,175604 Pa dan juga saluran keluar yaitu 9,518271 Pa.

4.2.6 Perhitungan tekanan jatuh pada *penstock*

Besarnya tekanan jatuh pada *penstock* yaitu:

Tekanan total inlet $p_1 = 309.365,3 \text{ Pa}$

Tekanan total outlet $p_2 = 304.235,4 \text{ Pa}$

$$(\Delta p_{total}) = p_1 - p_2$$

$$(\Delta p_{total}) = 309.365,3 \text{ Pa} - 304.235,3 \text{ Pa}$$

$$(\Delta p_{total}) = 5.129,9 \text{ Pa}$$

$$\text{Tekanan jatuh (\%)} = \frac{\Delta p_{total}}{p_1} \times 100\%$$

$$\text{Tekanan jatuh (\%)} =$$

$$= \frac{5.129,9 \text{ Pa}}{309.365,3 \text{ Pa}} \times 100\%$$

$$\text{Tekanan jatuh (\%)} = 1,658201\%$$

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Hasil analisis karakteristik aliran fluida dalam *penstock* yang terdapat di PLTM Hatu dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan perangkat lunak GAMBIT 2.3.16 dan Fluent 6.3.26 adalah sebagai berikut:

- Tekanan statis pada saluran masuk *penstock* adalah 305.769,9 Pa, di *default-interior* adalah 305.769,9 Pa, di bagian dinding 305.769,9 Pa dan pada saluran keluar sebesar 300.009,8 Pa.
- Tekanan dinamis yang terjadi pada saluran masuk *penstock* adalah 3.595,365 Pa, di bagian *default-interior* adalah 4.253,647 Pa, di bagian dinding adalah 3.602,503 Pa dan pada saluran keluar adalah 4.229,900 Pa.
- Tekanan absolut pada saluran masuk sebesar 407.094,4 Pa, di bagian *default-interior* sebesar 407.094,9 Pa, di bagian dinding *penstock* adalah 407.094,9 Pa dan pada saluran keluar adalah 401.334,8 Pa.
- Total tekanan di saluran masuk adalah 309.365,3 Pa, di bagian *default-interior* adalah 309.365,3 Pa, di bagian dinding adalah 309.365,3 Pa dan pada saluran keluar adalah 304.235,4 Pa.

- e. Koefisien tekanan pada saluran masuk adalah 499.216,3 Pa, di *default-interior* sebesar 499.216,3 Pa, di bagian dinding adalah 499.216,3 Pa dan pada saluran keluar sebesar 489.812,0 Pa.
- f. Kecepatan air pada saluran masuk adalah 2,681554 m/detik, di bagian *default-interior* sebesar 2,916727 m/detik, di bagian dinding adalah 2,684047 m/detik dan pada saluran keluar *penstock* sebesar 2,908574 m/detik.
- g. Energi kinetik turbulensi pada saluran masuk adalah 0,0077527 Joule, di bagian *default-interior* adalah 0,0311980 Joule, pada bagian dinding *penstock* adalah 0,0311980 Joule dan bagian saluran keluar adalah 0,0311046 Joule.
- h. Koefisien gesekan yang terjadi pada saluran masuk adalah 8,449965, pada bagian *default-interior* adalah 15,655900, pada bagian dinding sebesar 15,655900 dan saluran keluar adalah 15,540040.
- i. Tegangan geser pada saluran masuk *penstock* adalah 5,175604 Pa, di bagian *default-interior* adalah 9,589236 Pa, di bagian dinding adalah 9,589236 Pa dan pada saluran keluar adalah 9,518271 Pa.

Berdasarkan hasil perhitungan yang didapat, untuk total tekanan maksimal yang terjadi pada *penstock* yaitu sebesar

309.365,3 Pa, sehingga dapat menjadi acuan atau bahan pertimbangan untuk pemilihan material dari *penstock*.

5.2 Saran

1. Peneliti selanjutnya gunakan variasi kemiringan dari *penstock*.
2. Disarankan pada pihak PLTM Hatu untuk mempelajari hasil simulasi yang didapat sebagai bahan pertimbangan untuk pemilihan material *penstock*.

DAFTAR PUSTAKA

- a. Al-Shemmeri, T., *Engineering Fluid Mechanics*. <http://bookboon.com/en/mechanics-ebooks>
10 Juni 2014
- b. Anonimous. 2000. *Welded Steel Penstock*. U.S. Government Printing Office. Washington.
- c. Anonimous, Statistik Energi Baru Terbarukan. http://www.esdm.go.id/statistik/data-sektor-esdm/cat_view/58-publikasi/240-statistik/355-statistik-energi-baru-terbarukan.html
9 Juni 2014
- d. Anonimous, Teori Simulasi. <http://www.google.co.id/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&cad=rja&uact=8&ved=0CEgQFjAH&url=http%3A%2F%2Frep>

ository.usu.ac.id%2Fbitstream%2F123456789%2F22220%2F4%2FCapter%2520II.pdf&ei=Zs0hVIKjBIahugTqr4GwAQ&usg=AFQjCNFwGe8KbaU43YooPqnegfxHC67Csw&bvm=bv.75775273,d.c2E

23 September 2014

- e. Boucher, M. *How Best –In-Class Companies Amplify Engineering With CFD*. <http://www.ansys.com>
27 Juli 2014

- f. Kadiman, K., Buku Putih. <http://web.ipb.ac.id/~tepfeta/elearning/media/Energi%20dan%20Listrik%20Pertanian/MATERI%20WEB%20ELP/Bab%20V%20ENERGI%20AIR/indexAir.htm>

30 April 2014

- g. Permatasari, R. eprints.undip.ac.id/34513/5/1501_chapter_II.pdf.
http://www.google.com/url?sa=t&rc=ct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCwQFjAB&url=http%3A%2F%2Feprints.undip.ac.id%2F34513%2F5%2F1501_chapter_II.pdf&ei=9PBTU4C3MoSWrAe62oDoBg&usg=AFQjCNFM0I4aLZq7_CTc_EC5IFDZwH6TFA&bvm=bv.65058239,d.bmk

21 April 2014

- h. Salatnaya, R. 2008. Studi Pendahuluan Kelayakan PLTM

Hatu. Skripsi Jurusan Teknik Elektro Universitas Sam Ratulangi, Manado.

- i. Skire. *Nzoro hydro power plant – penstock*.

<http://www.panoramio.com/photo/79529826>

21 Agustus 2014

- j. Subekti, R.A. dan Susatyo, A. 2009. Perancangan *Penstock Menggunakan Software Computational Fluid Dynamics*. Puslit Tenaga Listrik dan Mekatronik-LIPI, Serpong.

- k. Tuakia, F. 2008. Dasar-dasar CFD Menggunakan FLUENT. Informatika, Bandung.

- l. Warnick, C.C. 1984. *Hydropower Engineering*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey.